

МОДЕЛИ ПАРАЛЛАКТИЧЕСКОЙ ОШИБКИ ЛИНЗОВОГО МОНОБЛОЧНОГО КОЛЛИМАТОРНОГО ПРИЦЕЛА

Н.В. СЕНАТОРОВ (КП “ЦКБ “Арсенал” г. Киев),
В.И. МИКИТЕНКО (НТУУ «Киевский политехнический институт»)

Представлены модели параллакса для двух типов схемы прицела: с плоской и сферической поверхностью склейки оптических деталей.

Представлено моделі паралаксу для двох типів схеми прицілу: з плоскою та сферичною поверхнею склейки оптичних деталей.

Parallax models are represented for two scheme types: with plane and spherical surface of optical details sticking together.

Постановка задачи. Как показано в [1], линзовый моноблочный коллиматорный прицел (КП) превосходит другие типы прицелов по многим показателям, уступая лишь по точности. Применение [асферических оптических элементов](#) [2] или цветное кодирование зоны допустимого параллакса [3] решают эту проблему, но увеличивают стоимость изделия, а цветное кодирование влияет на эргономические показатели.

Поэтому определение условий, когда параллактическая ошибка в линзовом моноблоке минимальна, и путей её уменьшения становится важной научной задачей.

На рис. 1 изображён линзовый моноблок, склеенный из двух оптических элементов из разного сорта стекла. Линза 1 толщиной d_1 изготовлена из стекла с показателем преломления n_2 , а пластинка 2 толщиной d_2 – из стекла с показателем преломления n_3 .

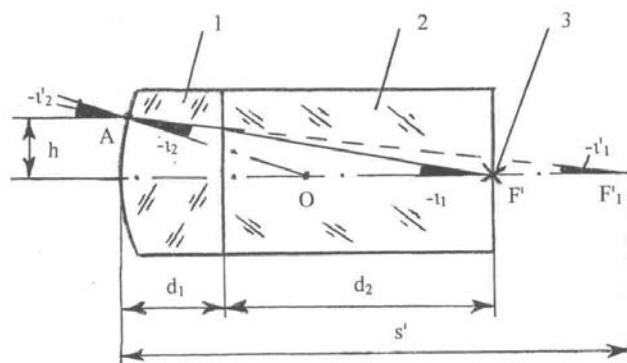


Рис. 1. Линзовый моноблок: 1 – линза, 2 – пластинка, 3 – прицельная сетка,
 i и i' – углы преломления произвольного луча

Параксиальный луч в прямом ходе, идущий параллельно оптической оси, фокусируется сферической поверхностью с радиусом кривизны $r_1 = OA$ в точке F'_1 , отстоящей от преломляющей поверхности на расстояние:

$$s' = n_2 r_1 / (n_2 - 1). \quad (1)$$

Расстояние s' и толщины d_1, d_2 связаны соотношением:

$$s' = d_1 + d_2 n_2 / n_3. \quad (2)$$

Принимая условие нормировки $(d_1 + d_2) = 1$, формулу (1) представим в виде:

$$r_1 = (n_2 - 1) [d_1 (n_2^{-1} - n_3^{-1}) + n_3^{-1}]. \quad (3)$$

В первом частном случае, когда $d_1 = 0$, моноблок представляет собой одну толстую линзу из стекла с показателем преломления n_3 и

$$r_1 = (n_3 - 1) / n_3. \quad (4)$$

Во втором частном случае, когда $d_1 = 1$, моноблок представляет собой одну толстую линзу из стекла с показателем преломления n_2 и

$$r_1 = (n_2 - 1) / n_2. \quad (5)$$

При известных параметрах моноблока: r_1, d_1 и n_i и заданном значении апертурного угла u_1 произвольного луча из точки F' в обратном ходе - угол u'_1 его наклона после преломления на плоскости находим по формуле Снеллиуса:

$$\sin u'_1 = (n_3/n_2) \sin u_1. \quad (6)$$

Из $\triangle AOF'_1$ находим угол u_2 наклона луча:

$$\sin u_2 = [(d_2 \operatorname{tg} u_1 / r_1 \operatorname{tg} u'_1) - 1 + d_1 / r_1] \sin u'_1. \quad (7)$$

Угол u'_2 наклона луча на выходе моноблока определяем по формуле Снеллиуса:

$$\sin u'_2 = n_2 \sin u_2. \quad (8)$$

Выражение для параллактической ошибки δ данного луча имеет вид:

$$\delta = u'_2 - u_2 - u'_1.$$

При этом координата h луча на выходном зрачке вычисляется по формуле:

$$h = r_1 \sin (u_2 + u'_1),$$

а масса моноблока M – по приближённой формуле:

$$M \approx \pi h^2 [d_1 (\rho_1 - \rho_2) + \rho_2], \quad (9)$$

где ρ_i – удельный вес стекла.

Принимая $n_1 = 1,8138$ (стекло ТФ10, у которого $\rho_1 = 5,19$ г/см³) и $n_2 = 1,4721$ (стекло ЛК7, у которого $\rho_2 = 2,3$ г/см³), что соответствует максимальному и минимальному значению показателя преломления стекла, выпускаемого отечественной промышленностью [4], и подставляя эти значения в (3), (4), (5) и (9) получаем:

$$r_1 = 0,5528 - 0,1041 d_1; \quad (10)$$

$$M \approx (9,07 d_1 + 7,23) h^2;$$

$$\begin{aligned} r_{1\max} &= 0,4478; & M_{\max} &\approx 16,3 h^2; \\ r_{1\min} &= 0,3207; & M_{\min} &\approx 7,23 h^2. \end{aligned}$$

В частных случаях, когда $d_1 = 0$ или $d_1 = 1$, формулы (6), (7) и (8) принимают вид:

$$t'_1 = u_1;$$

$$\sin u_2 = \sin u_1 / (n_{2(3)} - 1); \quad (11)$$

$$\sin t'_2 = n_{2(3)} \sin u_1 / (n_{2(3)} - 1),$$

а выражение для параллактической ошибки -

$$\delta = t'_2 - u_2 - u_1. \quad (12)$$

Подставляя в выражения (11) и (12) найденные экстремальные значения r_1 , получаем окончательные выражения для углов u_2 и t'_2 . Для $r_{1\max}$ имеем:

$$\sin u_2 = 1,2288 \sin u_1; \quad \sin t'_2 = 2,2288 \sin u_1.$$

Для $r_{1\min}$ имеем:

$$\sin u_2 = 2,1182 \sin u_1; \quad \sin t'_2 = 3,1182 \sin u_1.$$

Заметим, что отношение $\operatorname{tg} u_1 / \operatorname{tg} t'_1$ в формуле (7) можно аппроксимировать выражением $\sin u_1 / \sin t'_1$, при этом погрешность аппроксимации не превысит 0,5% для угла u_1 до 9° . Подставляя в (6) – (8) значения n_i , (10) и аппроксимацию, получаем окончательные выражения для общего случая углов t'_1 , u_2 и t'_2 :

$$\sin t'_1 = 0,8116 \sin u_1,$$

$$\sin u_2 = (0,5513 - 0,1039 d_1) \sin u_1 / (0,5528 - 0,1041 d_1),$$

$$\sin t'_2 = (1 - 0,1885 d_1) \sin u_1 / (0,5528 - 0,1041 d_1).$$

На рис. 2 приведены графики зависимости $\delta = F(h)$ для экстремальных и трёх промежуточных значений d_1 : 0,25; 0,5 и 0,75. Ограничивая предельную параллактическую ошибку значением 3 мрад (соответствует промаху 0,3 м на дальности 100 м), определим по графикам линейную апертуру D прицела и вычислим его массу при конструктивном различном исполнении моноблока:

$d_1 = 0$ (кривая 1):	Стекло ЛК7;	$D = 0,174$;	$M = 0,0547$;
$d_1 = 1$ (кривая 2):	Стекло ТФ10;	$D = 0,25$;	$M = 0,2547^*$;
$d_1 = 0,25$ (кривая 3):	Стекло ТФ10/ЛК7;	$D = 0,276$;	$M = 0,1809$;
$d_1 = 0,5$ (кривая 4):	Стекло ТФ10/ЛК7;	$D = 0,27$;	$M = 0,2144$;
$d_1 = 0,75$ (кривая 5):	Стекло ТФ10/ЛК7;	$D = 0,26$;	$M = 0,2371$.

* - масса моноблока может быть снижена до 0,1809 при выполнении поверхности склейки по радиусу, равному d_2 .

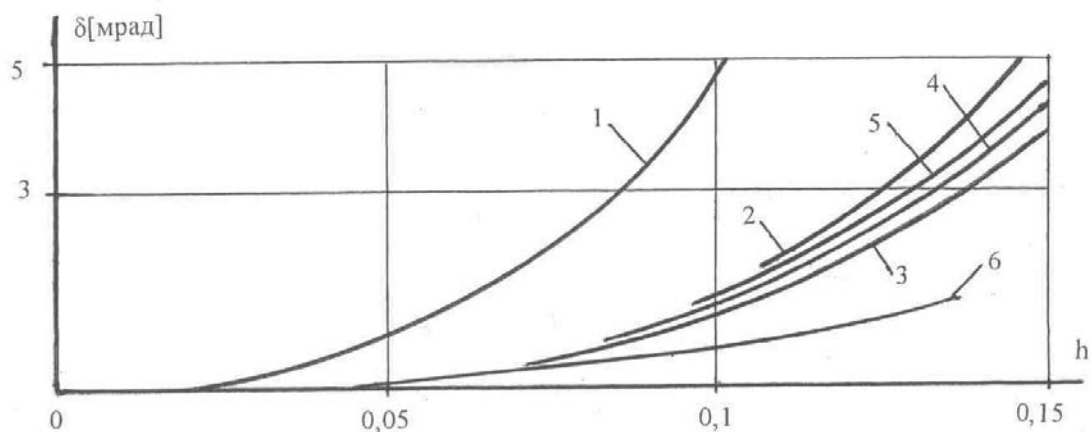


Рис. 2. Графики зависимости $\delta = F(h)$

Сопоставление этих пяти конструктивных исполнений КП по методике, изложенной в [5], показывает, что по обобщённому показателю качества преимущество имеет склеенный моноблок с толщиной линзы $d_1 = 0,25$.

Одним из возможных путей повышения точности в линзовом моноблочном КП следует рассматривать применение сферической поверхности склейки деталей 1 и 2 (рис. 3).

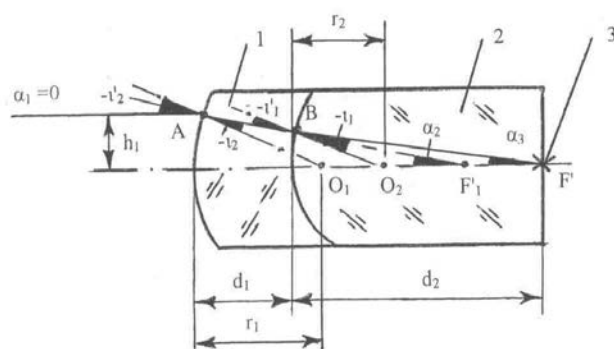


Рис. 3. Линзовый моноблок: 1 – линза, 2 – линзовый элемент, 3 – прицельная сетка, i_i и i'_i – углы преломления произвольного луча, α_i – углы наклона первого вспомогательного луча

Согласно теории aberrаций третьего порядка [6] параллактическая ошибка, обусловленная сферической aberrацией, будет исключена при условии

$$\sum h_k P_k = 0, \quad (13)$$

где h_k – высота первого вспомогательного луча на преломляющей поверхности с номером k ($k = 1, 2$), а P_k – основной параметр этой поверхности, определяемый зависимостью:

$$P_k = (\alpha_{k+1} \mu_{k+1} - \alpha_k \mu_k)(\alpha_{k+1} - \alpha_k)^2 / (\mu_{k+1} - \mu_k)^2.$$

Здесь α_k – угол наклона вспомогательного луча на поверхности с номером k ($k = 1, 2, 3$), а $\mu_k = n_k^{-1}$.

Проводя расчёт в прямом ходе лучей, примем условия нормировки: $\alpha_1 = 0$; $h_1 = 0,138$ (соответствует максимальному найденному значению $D/2$ на графике); $d_1 = 0,25$; $d_2 = 0,75$; $\mu_1 = 1$; $\mu_2 = 1/0,8138 = 0,5513$ и $\mu_3 = 1/1,4721 = 0,6793$.

В параксиальной области справедливы соотношения:

$$h_2 = h_1 - d_1 \alpha_2 = 0,138 - 0,25 \alpha_2, \quad (14)$$

$$\alpha_3 = h_2 / d_2 = 0,184 - 0,3333 \alpha_2. \quad (15)$$

С учётом этого выражения для основных параметров преломляющих поверхностей принимают вид:

$$P_1 = \alpha_2^3 \mu_2 / (\mu_2 - 1)^2 = 2,7383 \alpha_2^3; \quad (16)$$

$$P_2 = (\alpha_3 \mu_3 - \alpha_2 \mu_2)(\alpha_3 - \alpha_2)^2 / (\mu_3 - \mu_2)^2 = 60,9757 (-1,3826 \alpha_2^3 + 0,6038 \alpha_2^2 - 0,0877 \alpha_2 + 0,0042). \quad (17)$$

После подстановки (14), (16) и (17) в (13) и преобразований получаем уравнение:

$$21,0793 (\alpha_2^4 - 0,9708 \alpha_2^3 + 0,3043 \alpha_2^2 - 0,0382 \alpha_2 + 0,0017) = 0.$$

Это уравнение имеет два мнимых и два действительных корня: $\alpha_2^{(1)} = 0,5044$ и $\alpha_2^{(2)} = 0,2295$. Подставляя найденные действительные значения $\alpha_2^{(i)}$ в (14) и (15), находим две пары значений $h_2^{(i)}$ и $\alpha_3^{(i)}$:

$$h_2^{(1)} = 0,0119;$$

$$\alpha_3^{(1)} = 0,0159;$$

$$h_2^{(2)} = 0,0806;$$

$$\alpha_3^{(2)} = 0,01075.$$

Радиусы кривизны преломляющих поверхностей r_k определим по формуле [6]:

$$r_k = h_k (n_{k+1} - n_k) / (\alpha_{k+1} n_{k+1} - \alpha_k n_k).$$

Первое значение угла $\alpha_2^{(1)}$ даёт радиусы, которые технологически невыполнимы. Для второго значения $\alpha_2^{(2)}$ находим:

$$r_1 = h_1 (n_2 - 1) / \alpha_2 n_2 = 0,2698.$$

$$r_2 = h_2 (n_3 - n_2) / (\alpha_3 n_3 - \alpha_2 n_2) = 0,1067.$$

Из размерных цепей на рис. 3 находим габаритные соотношения между линейными и угловыми величинами:

$$O_1 F'_1 = O_2 F'_1 + r_2 + d_1 - r_1 = O_2 F'_1 + 0,0869;$$

$$O_2 F' = d_1 - r_2 = 0,6433;$$

$$\alpha_2 = \alpha_3 + t'_1 - t_1.$$

При известных параметрах моноблока: r_i , d_i и n_i и заданном значении апертурного угла ι_3 произвольного луча из точки F' в обратном ходе - угол ι_1 его наклона после преломления находим из $\Delta O_2BF'$ в обратном ходе лучей:

$$\sin \iota_1 = O_2F' \sin \iota_3 / r_2 = 6,0291 \sin \iota_3 .$$

Из $\Delta O_2BF'_1$ находим отрезок $O_2F'_1$:

$$O_2F'_1 = r_2 \sin \iota'_1 / \sin \alpha_2,$$

учитывая, что угол ι'_1 связан с углом ι_1 формулой (6). Из $\Delta O_1AF'_1$ находим угол ι_2 :

$$\sin \iota_2 = O_1F'_1 \sin \alpha_2 / r_1 = (3,7064 O_2F'_1 + 0,3221) \sin \alpha_2,$$

учитывая, что угол ι_2 связан с углом ι'_2 формулой (8). Согласно рис. 3 выражение для параллактической ошибки δ в этом случае определяется формулой:

$$\delta = \iota'_2 - \iota_2 - \alpha_2,$$

а координата h_1 луча на выходном зрачке вычисляется по формуле:

$$h_1 = r_1 \sin (\iota_2 + \alpha_2) = 0,2698 \sin (\iota_2 + \alpha_2).$$

График зависимости $\delta = F(h_1)$ представлен на рис. 2 кривой 6. Как следует из сопоставления кривых 3 и 6, введение сферической поверхности склейки в 2,5 раза повышает точность линии прицеливания при равных массогабаритных характеристиках КП.

Выводы. На основании проведенных расчетов предложены два варианта моноблочных коллиматорных прицелов с повышенной точностью прицеливания. Прицел из двух оптических деталей с разным показателем преломления, склеенных по плоскости, обеспечивает линейную апертуру выходного зрачка прицела, равную 0,276, при параллаксе 3 мрад и массе моноблока 0,1809.

Моноблочный коллиматорный прицел из двух оптических деталей с разным показателем преломления, склеенных по сферической поверхности, при такой же линейной апертуре выходного зрачка прицела и массе обеспечивает параллакс 1,25 мрад.

1. Сенаторов Н.В., Микитенко В.И. Оптимизация конструкции моноблочного коллиматорного прицела // Артиллерийское и стрелковое вооружение: Междунар. науч.-техн. журнал. – Киев: НТЦ АСВ. - 2003. – № 1(8). – С. 27-29.
2. Сенаторов Н.В. Моноблочный коллиматорный прицел для стрелкового оружия // Зб. праць 4-ї Міжнарод. конф. “Артилерійські ствольні системи, боеприпаси, засоби артилерійської розвідки та керування вогнем”.- Киев: НТЦ АСО. - 2000. – С.194-199.
3. Пат. 43156 А (Украина), МКИ G02В 27/00. Коліматорний приціл.-2001.- Бюл. № 10 / Н.В.Сенаторов.
4. Трубка С.В. Расчёт двухлинзовых склеенных объективов. Справочник – Л.-д.: “Машиностроение”, 1984. - 142 с.
5. Микитенко В.И., Сенаторов Н.В. Классификация и методика сопоставительного анализа оптических схем коллиматорных прицелов // Артиллерийское и стрелковое вооружение: Междунар. науч.-техн. сб. – Киев: НТЦ АСВ. - 2003. – Вып. 7. – С. 8-12.

6. *Турьгин И.А.* Прикладная оптика. - М.: "Машиностроение", 1966. - 432 с.